

УДК621.92.01

А.А. Якимов, канд. техн. наук, Одесса, Украина

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ТАРЕЛЬЧАТЫМИ КРУГАМИ НУЛЬ- ГРАДУСНЫМ МЕТОДОМ, С УЧЕТОМ МНОГОПРОХОДНОСТИ

Уперше теоретично обгрунтована відмінність температур, формованих при зубошлифуванні тарільчастими кругами в різних точках оброблюваного евольвентного профілю.

Впервые теоретически обосновано различие температур, формируемых при зубошлифовании тарельчатыми кругами, в разных точках обрабатываемого эвольвентного профиля.

Firstly in theory a distinction of the temperatures formed in the gear grinding by the dish wheels in the different points of a processed in volute profile is grounded.

1. Постановка проблемы. Одной из основных тенденций современного машиностроения является стремление уменьшить габариты зубчатых передач за счет увеличения нагрузочной способности их зубьев. Это возможно осуществить за счет повышения точности изготовления зубчатых колес. В редукторах авиационных двигателей применяются колеса 3-4 степеней точности. Третья степень точности может быть достигнута только шлифованием на станках, работающих двумя тарельчатыми кругами нульградусным методом. Обработка на этих станках сопровождается высокой теплонапряженностью, так как осуществляется без принудительного охлаждения и каждая точка обрабатываемой поверхности подвергается многократному тепловому воздействию. Высокая теплонапряженность зубошлифования оказывает существенное влияние на свойства поверхностного слоя и контактную выносливость зубьев. Экспериментальным путем установлено [1], что глубина структурно-измененного слоя различна по высоте и в большинстве случаев максимальна на его головке. По высоте зуба от головки к ножке существенно уменьшается глубина отпущенного слоя. Для теоретического обоснования этой закономерности необходимо иметь аналитические зависимости для расчета температур, возникающих при шлифовании тарельчатыми кругами нульградусным методом, с учетом многократного теплового воздействия, воспринимаемого каждой точкой боковой поверхности зуба. Существующие аналитические выражения для определения температур при многопроходном шлифовании [2], [3], [4] не позволяют производить расчеты

температур в разных точках профиля зуба, так как предназначены для других схем шлифования.

2. Цель исследования. Целью настоящей работы является выявление причин и закономерностей изменения глубин распределения структурно измененных слоев по высоте зуба, образующихся при шлифовании на станках, работающих тарельчатыми кругами нульградусным методом. Для этого необходимо разработать математические модели для определения температур на разных участках обрабатываемого профиля зуба.

3. Основные материалы исследования. Шлифование зубчатых колес на станках 5851, 5853, МААГ осуществляется кругами-тарелками на керамической связке. На рис. 1 показан фрагмент поверхности, сформированной на цилиндре, фрагмент которого имитирует участок обрабатываемой поверхности зуба, после одностороннего обкаточного движения по нему тарельчатого шлифовального круга.

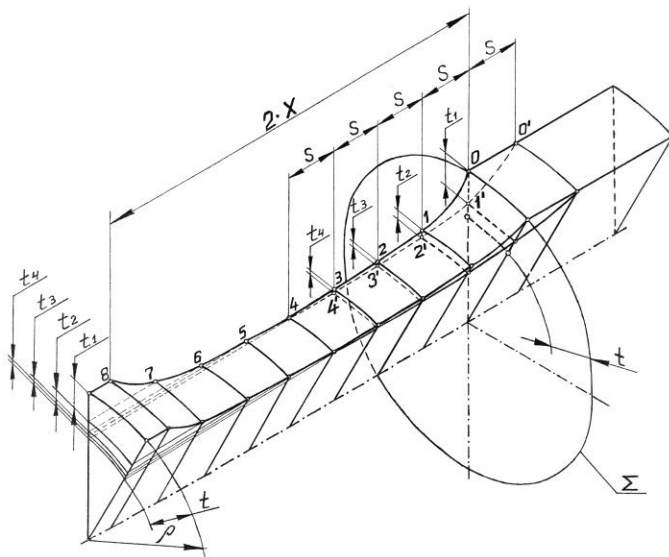


Рисунок 1 – Фрагмент поверхности, сформированной конической частью тарельчатого шлифовального круга при его обкаточном движении от впадины к головке зуба

Если допустить, что при шлифовании на станках 5851, 5853, МААГ с нулевой настройкой кругов за одно одностороннее обкаточное движение тарельчатый круг сформирует канавку с профилем 0 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8, то на обратном пути из-за смещения вдоль обрабатываемого зуба на величину

продольной подачи S им будет сформирована поверхность с профилем $0' - 1' - 2' - 3' - 4'$. Из-за того, что шлифование на станке МААГ с нулевой настройкой кругов осуществляется с продольной подачей S , реальная длина зоны контакта будет в два раза меньше ширины канавки с профилем $8 - 7 - 6 - 5 - 4 - 3 - 2 - 1 - 0$.

При шлифовании на станках МААГ, 5851. 5853 с нулевой настройкой тарельчатых кругов абразивный инструмент неоднократно проходит над каждой точкой боковой поверхности обрабатываемого зуба и тепловой источник при своем движении встречается с участками теплопроводящего пространства, предварительно нагретыми на предыдущих обкаточных движениях. Размеры пятна контакта зуба шестерни с абразивным инструментом непрерывно меняются в процессе перемещения последнего от впадины до вершины зуба и назад. При движении шлифовального круга от впадины к вершине зуба длина и ширина пятна контакта непрерывно увеличиваются, а при движении в обратном направлении – уменьшаются. Это объясняется тем, что радиус кривизны эвольвенты вблизи впадины ρ_H имеет наименьшую величину, а на вершине зуба ρ_F – наибольшую.

На рис. 2 показаны зоны контакта тарельчатого шлифовального круга с двумя цилиндрами, один из которых имитирует участок эвольвентного профиля вблизи впадины, а другой – в районе линии пересечения обрабатываемой поверхности с делительным цилиндром зубчатого колеса.

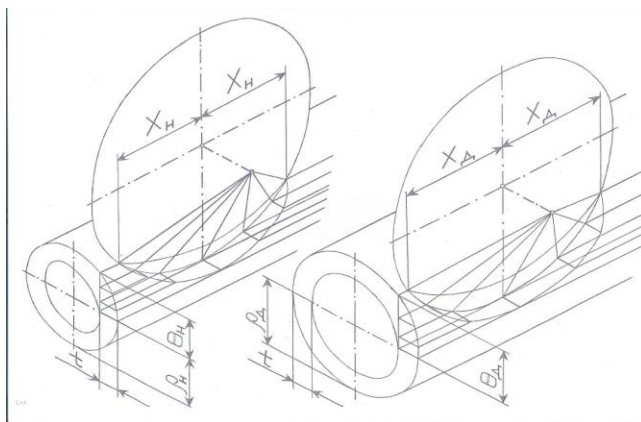


Рисунок 2 – Схема, которая раскрывает причины увеличения длины зоны контакта ($X_D > X_H$) при росте радиусов цилиндров ($\rho_D > \rho_H$), которые имитируют участка эвольвентного профиля зуба на ножке и в районе делительной окружности

Из рисунка видно, что при одной и той же глубине резания t длины пятен контакта X_n и X_d разные: $X_n < X_d$.

На рис. 3 показана схема снятия металла абразивным инструментом с боковой поверхности зуба шестерни на станках 5851, 5853, МААГ с нулевой настройкой тарельчатых кругов.

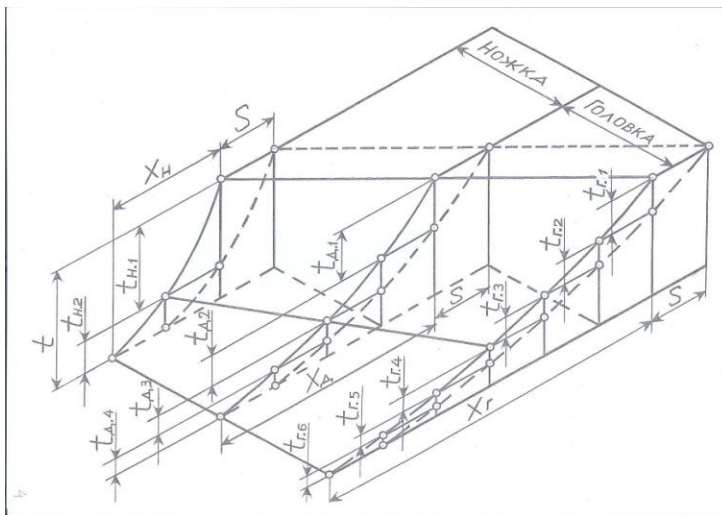
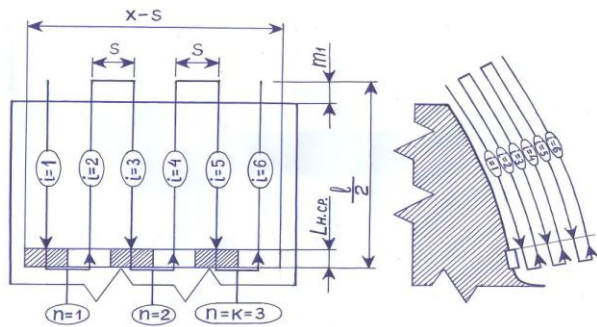


Рисунок 3 – Схема, которая иллюстрирует увеличение длины пятна контакта обрабатываемой поверхности с тарельчатым шлифовальным кругом по мере приближения последнего к вершине зуба

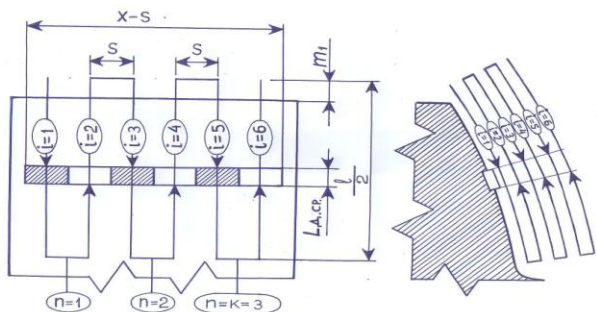
Из схемы видно, что в процессе обкаточного движения шлифовального круга по зубу от его вершины до впадины длина пятна контакта уменьшается: $X_r > X_d > X_n$. Это обстоятельство приводит к тому, что точки, расположенные в разных зонах обрабатываемого профиля, воспринимают разное количество тепловых воздействий.

Из схемы, приведенной на рис. 3 видно, что точки, расположенные у вершины зуба, в средней части зуба и вблизи впадины будут воспринимать соответственно шесть, четыре и два тепловых воздействия.

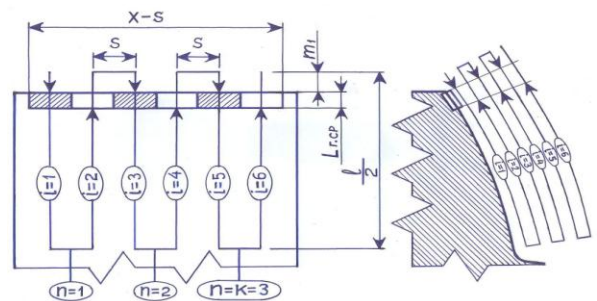
В основу моделирования температурных полей при многопроходном шлифовании положим одномерную теплофизическую схему, в которой точка теплопроводящей среды подвергается многократному нагреву в результате ее периодического прохождения под неподвижным плоским тепловым источником, расположенным в нижней (рис.4,а), средней (рис.4,б) и верхней (рис.4,в) частях эвольвентного профиля обрабатываемого зуба.



а)

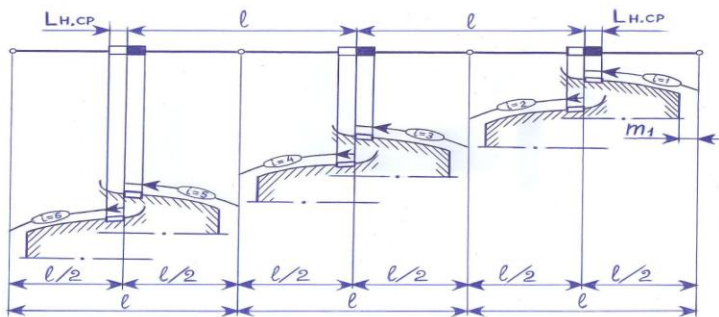


б)

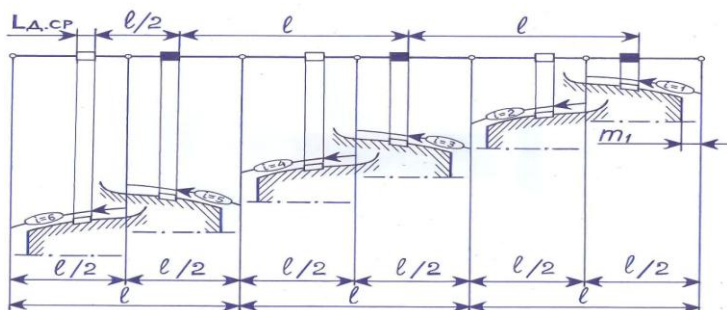


в)

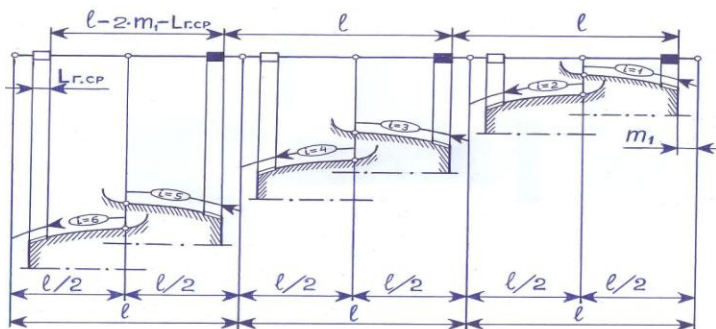
Рисунок 4 – Схема многократного прохождения точки под тепловым источником, расположенным в нижней (а), средней (б) и верхней частях обрабатываемого зуба (в)



а)

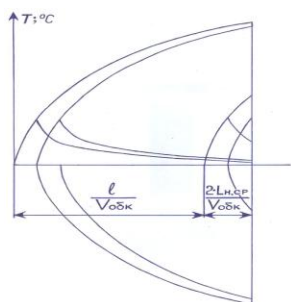


б)

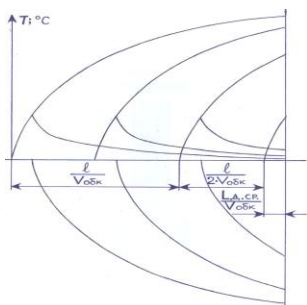


в)

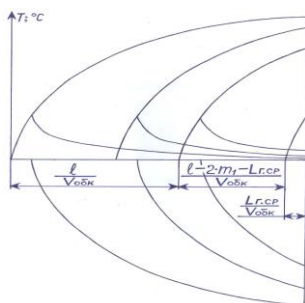
Рисунок 5 – Схема прохождения точки при трех прямых и трех обратных ходах под тепловым источником, расположенным в нижней (а), средней (б) и верхней (в) частях эвольвентного профиля зуба



а)

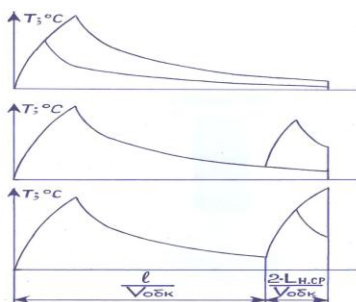


б)

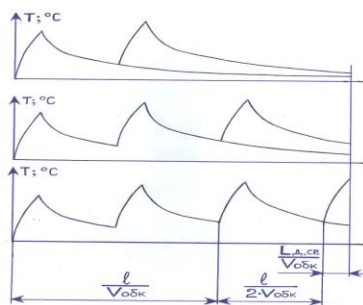


в)

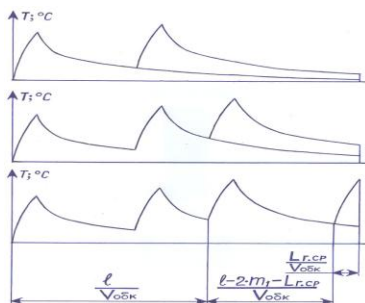
Рисунок 6 – Схема формирования тепловых импульсов при прохождении точки под тепловым источником, расположенным в нижней (а), средней (б) и верхней (в) частях эвольвентного профиля зуба



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Схема формирования результирующей температуры в точке, расположенной в нижней (а), средней (б) и верхней (в) частях эвольвентного профиля зуба, после двух прямых и двух обратных ходов

Результирующее температурное поле представляет собой наложение температурных полей, образующихся при прохождении точки обрабатываемой поверхности под тепловыми источниками при прямых ходах (на рис.5 источники выглядят в виде закрашенных прямоугольников) и при обратных ходах (тепловые источники выглядят в виде незакрашенных прямоугольников). Каждые отдельно взятые температурные поля, из которых складывается результирующее поле, образуются суперпозицией (наложением) двух полей от двух тепловых источников: положительного и отрицательного. Эти источники имеют одинаковые интенсивности теплового потока, но продолжительность действия отрицательного источника меньшая, чем положительного. Разность времен действия этих источников равна отношению ширины пятна контакта шлифовального круга с обрабатываемым зубом к скорости обкатывания. На рис. 6 показано формирование температурных полей методом суперпозиции на разных участках обрабатываемой боковой поверхности зуба, а на рис. 7 приведены схемы формирования результирующих температур.

Применением принципа суперпозиции, были получены формулы (1), (2), (3) для определения температур в нижней, средней и верхней частях эвольвентного профиля зуба соответственно.

$$\begin{aligned}
 T_k = & \frac{2 \cdot \Psi \cdot q_n}{\sqrt{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + 2 \cdot \frac{L_{н.сп}}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + 2 \cdot \frac{L_{н.сп}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
 & \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.сп}}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.сп}}{V_{обк}}}} \right) \right] + \\
 & + \frac{2 \cdot \Psi \cdot q_n}{\sqrt{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.сп}}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.сп}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
 & \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}}} \right) \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$T_k = \frac{2 \cdot \Psi \cdot q_d}{\sqrt{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}} + \frac{L_{д.сп}}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}} + \frac{L_{д.сп}}{V_{обк}}}} \right) - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}}}} \right) \Bigg] + \\
 & + \frac{2 \cdot \psi \cdot q_n}{\sqrt{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{л.сп}}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{л.сп}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
 & \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}}} \right) \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_k = & \frac{2 \cdot \psi \cdot q_r}{\sqrt{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1)}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1)}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
 & - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1 - L_{г.сп})}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1 - L_{г.сп})}{V_{обк}}}} \right) \Bigg] + \\
 & + \frac{2 \cdot \psi \cdot q_r}{\sqrt{c \cdot \rho_m \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l_{г.сп}}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l_{г.сп}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
 & \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}} \cdot ierfc \left(\frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}}} \right) \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $V'_{обк}$ – средняя скорость обкатывания; $V_{обк} = \frac{V'_{обк \max}}{2}$;

$V'_{обк \max}$ – скорость обкатывания посреди обрабатываемого профиля зуба;

$$V'_{обк.Д} = \frac{2 \cdot n'}{1000} \cdot tg \left(\arccos \frac{r_{\omega} \cdot \cos \alpha_{t\omega}}{r_{\omega} + 1,2 \cdot m + m_1} \right) \cdot R_p$$

n' – число двойных обкаточных движений в минуту; R_p – радиус ролика обкатывания; r_{ω} – радиус делительной окружности;

$$r_{\omega} = R_p = \frac{r_o}{\cos 20^{\circ}} = \frac{m \cdot z_1}{2}$$

z_1 – количество зубьев на обрабатываемом колесе; m – модуль зубчатого колеса; r_o – радиус основной окружности зубчатого колеса; $\alpha_{то}$ – угол зацепления; m_1 – величина выхода шлифовального круга за границы головки обрабатываемого зуба; l – длина обратного движения;

$$l = 2 \cdot (m + 1,25 \cdot m + m_1)$$

K – количество двойных обкаточных движений, оказываемых в пределах длины зоны контакта;

$$K_H = \frac{X_H - S}{2 \cdot S}; \quad K_D = \frac{X_D - S}{2 \cdot S}; \quad K_{\Gamma} = \frac{X_{\Gamma} - S}{2 \cdot S};$$

X_H, X_D, X_{Γ} – длина пятна контакта шлифовального круга с обрабатываемым зубом в нижней, средней и верхней частях обрабатываемого профиля соответственно; S – величина продольной подачи;

$$L_{cp.H} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot K} L_{i.H}}{2 \cdot K}; \quad L_{cp.D} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot K} L_{i.D}}{2 \cdot K}; \quad L_{cp.\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot K} L_{i.\Gamma}}{2 \cdot K};$$

$L_{cp.H}, L_{cp.D}, L_{cp.\Gamma}$ – средние значения ширины пятна контакта абразивного круга с обрабатываемым зубом в нижней, средней и верхней частях обрабатываемого профиля соответственно;

$L_{i.H}, L_{i.D}, L_{i.\Gamma}$ – размеры пятна контакта в его поперечных перерезах, которые отстоят друг от друга на величину продольной подачи, на нижней, среднем и верхнем участках обрабатываемого зуба соответственно;

$$q_H = \frac{P_{z.H} \cdot V_{kp}}{\Phi_H}; \quad q_D = \frac{P_{z.D} \cdot V_{kp}}{\Phi_D}; \quad q_{\Gamma} = \frac{P_{z.\Gamma} \cdot V_{kp}}{\Phi_{\Gamma}};$$

$q_H, P_{z.H}, \Phi_H, q_D, P_{z.D}, \Phi_D, q_{\Gamma}, P_{z.\Gamma}, \Phi_{\Gamma}$ – плотности тепловых потоков q , тангенциальные составные силы резания P_z и площади пятен контакта абразивного инструмента с обрабатываемым зубом Φ в нижней, средней и верхней частях эвольвентного профиля соответственно.

Каждая из формул (1), (2) и (3) содержит две суммы. Первая сумма учитывает возрастание температур в фиксированной точке теплопроводящей среды, формирующихся при прохождении этой точки под тепловым источником при прямых ходах. Вторая сумма учитывает возрастание температур, формирующихся при обратных ходах. Расчеты температур по

формулам (1), (2) и (3) показали, что температура в средней части профиля зуба на 40% меньше, чем на головке и на 20% меньше, чем на ножке (рис. 8) .

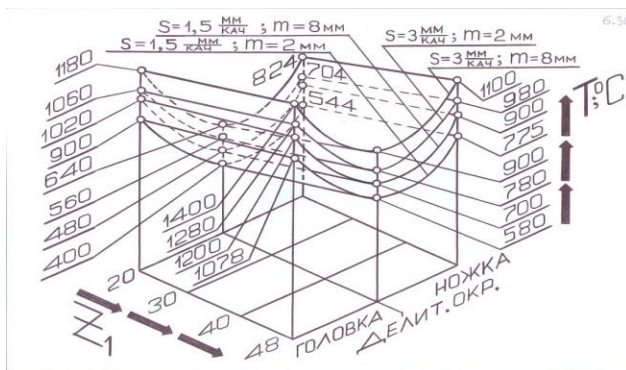


Рисунок 8 – Расчетные температуры, которые образовались при шлифовании зубчатых колес ($m = 2$ гт; $m = 8$ мм; $z_1 = 20; 30; 40; 48$) из цементируемой стали 12Х2Н4А ($\alpha = 0,05$ див²/сек) на станке МААГ с нулевой настройкой кругов на режимах: $t = 0,05$ мм; $n' = 112$ кач/мин; $S = 1,5$ мм/кач

4. Выводы. Разработаны математические модели (1), (2), (3) для определения температур на разных участках обрабатываемого эвольвентного профиля зуба. Расчеты температур показали, что температура в средней части профиля зуба на 40% меньше, чем на головке и на 20% меньше, чем на ножке. Различие температур объясняется тем, что в разных точках эвольвентных профилей, обрабатываемых тарельчатыми шлифовальными кругами по нулевой схеме, протекают различные тепловые процессы, обусловленные разным количеством тепловых воздействий, воспринимаемых каждой из этих точек, разными временными интервалами между этими воздействиями, разными временами действия тепловых источников.

Список использованных источников: 1. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. М.: «Машиностроение», 1981. – 232 с. 2. Ситайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. –М.: «Машиностроение», 1978. – 167 с. 3. Ситайлов В.А. Расчет температурного поля при многопроходном шлифовании торцом круга //Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: докл. конф./ Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1972. – С.139-143. 4. Свиричев В.И. Расчет температурного поля в детали при круглом торцовом шлифовании //Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении/ – Пермь: ПГТУ, 2012. – С.58-65.

Поступила в редколлегию 16.09.2013